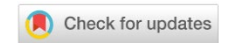
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





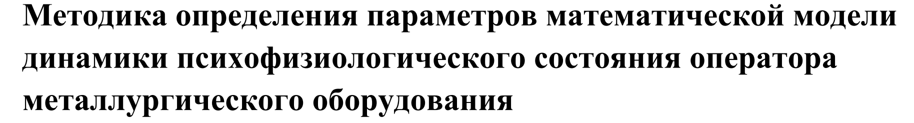
УДК 331.44:612.821.1:519.876.5
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-7-19

Научная статья



EDN: TGMDUK

Методика определения параметров математической модели динамики психофизиологического состояния оператора металлургического оборудования



Д.А. Вишневский, Л.Е. Подлипенская, Н.А. Денисова, Н.А. Бондарь
Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Российская Федерация
✉ natdeny@yandex.ru

Аннотация
Введение. Математическое моделирование эффективно при анализе промышленной безопасности на металлургических предприятиях, в частности для отслеживания проблем системы «человек — машина». Чтобы ввести в рассмотрение фактор времени, задействуют рекуррентные соотношения (в дискретной модели) и дифференциальные (в непрерывной). Однако необходимо также решить проблему привязки параметров модели к реальным условиям производственной среды и к человеческому фактору. Цель данного исследования — создание метода определения параметров имитационных математических моделей динамики психофизиологических показателей оператора, влияющих на его работу.

Материалы и методы. Психофизиологическое состояние (ПФС) оператора оценивали по работоспособности, утомляемости и ошибаемости. Данные собрали по тесту цифровой корректурной пробы (ЦКП). На основании полученных результатов вычислили экспериментальные значения показателей ПФС оператора, которые привели к нормированной шкале [0, 1]. Эти показатели для конкретного респондента, математическую модель и разработанный алгоритм задействовали при определении числовых значений параметров модели. Для интерпретации показателей работоспособности, утомляемости и ошибаемости ввели шкалы с пятью градациями.

Результаты исследования. Использование модифицированного авторами варианта математической модели показало значительное улучшение ее прогностических свойств. Из 10 участников наилучший результат оказался у респондента № 7, худший — у респондента № 8. В течение 1-го часа работы (с 9.00 до 10.00) их работоспособность выросла примерно одинаково, с 0,5–0,55 почти до 0,6. Затем показатель респондента № 7 активно увеличивался и до конца рабочего дня оставался существенно выше уровня «хороший». Показатель респондента № 8 падал и с 14.00 до 15.00 оказался ниже среднего. Разницу во многом определили хронотипы операторов. Их хронофизиологические особенности сказались также на утомляемости и ошибаемости. Для разных участников экспериментов варьировалось качество модели. В одном случае оно оказалось отличным (средняя относительная ошибка ≤5 %), в трех случаях — хорошим (≤10 %), в четырех — удовлетворительным (≤15 %).

Обсуждение и заключение. Предлагаемый подход дает возможность получить для каждого индивидуума динамические профили его психофизиологических характеристик, оценить их взаимосвязи и выполнить прогноз на основе модифицированной математической модели. Однако для расширения функциональных возможностей моделей в реальных условиях работы оператора металлургического оборудования требуется увеличить объем выборки, уменьшить шаг дискретного времени и выполнить исследования для различных условий работы с учетом технологических, климатических, экологических, психологических и прочих факторов.

Ключевые слова: безопасность на металлургических предприятиях, система «человек — машина», психофизиологическое состояние оператора, хронотип оператора, работоспособность оператора

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам Донбасского государственного технического университета за проявленный интерес к обсуждаемой теме, добросовестное прохождение анкетирования и интервьюирования, благодарят редакционную коллегию журнала и рецензента за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Финансирование. Исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2023-0005 в ЕГИСУ НИОКРТР).

Для цитирования. Вишневский Д.А., Подлипенская Л.Е., Денисова Н.А., Бондарь Н.А. Методика определения параметров математической модели динамики психофизиологического состояния оператора металлургического оборудования. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-7-19

Original article

Methodology for Determining the Parameters of a Mathematical Model of the Dynamics of the Psychophysiological State of a Metallurgical Equipment Operator

Dmitry A. Vishnevsky, Lidiya E. Podlipenskaya, Nataliya A. Denisova, Nadezhda A. Bondar
Donbas State Technical University, Alchevsk, Russian Federation
✉ natdeny@yandex.ru

Abstract
Introduction. Mathematical modelling is effective in the analysis of industrial safety at metallurgical plants, in particular for tracking problems of the man — machine system. To introduce the time factor, recurrence relations (in a discrete model) and differential relations (in a continuous model) are used. However, it is also necessary to solve the problem of linking the model parameters to the real conditions of the production environment and to the human factor. The aim of this study is to create a method for determining the parameters of simulation mathematical models of the dynamics of the operator's psychophysiological indicators affecting the work.
Materials and Methods. The operator's psychophysiological state (PPS) was assessed by performance, fatigue levels, and error rate. The data were collected by the Digital Correction Task (DCT) test. Based on the obtained results, the experimental values of the operator's PPS indicators, which were reduced to the normalized scale [0, 1], were calculated. These indicators for a particular respondent, the mathematical model and the developed algorithm were used to determine the numerical values of the model parameters. In order to interpret the indicators of performance, fatigue and error rate, we introduced scales with five gradations.
Results. The use of the authors' modified version of the mathematical model showed a significant improvement in its prognostic properties. Out of 10 participants the best result was shown by respondent no. 7, the worst result was shown by respondent no. 8. During the first working hour (from 9.00 to 10.00) their performance increased almost equally, from 0.5–0.55 to almost 0.6. Then the score of respondent no. 7 increased and remained well above the "good" level until the end of the day. The score of respondent no. 8 dropped and was below average from 14.00 to 15.00. The difference was largely determined by the operators' chronotypes. Their chronophysiological characteristics also affected fatigue and error rate. The model's quality varied for different participants in the experiments. In one case it was excellent (mean relative error ≤5%), in three cases it was good (≤10%) and in four it was satisfactory (≤15%).
Discussion and Conclusion. The proposed approach allows us to obtain the dynamic profiles of psychophysiological characteristics for every individual, to assess their interrelationships and to perform a prediction on the basis of a modified mathematical model. However, in order to extend the functionality of the models to the real working conditions of the metallurgical plant operator, it is necessary to increase the sample size, reduce the discrete time step and conduct studies for different working conditions, considering technological, climatic, environmental, psychological and other factors.

Keywords: safety at metallurgical enterprises, man — machine system, psychophysiological state of the operator, operator chronotype, operator performance

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the employees of the Donbass State Technical University for their interest in the topic under discussion and conscientious answers and interviews and thank the editorial board of the journal and the reviewer for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

Funding information. The researches were carried out at the expense of the federal budget (theme code: FRRU-2023-0005 in the Unified state information system for accounting the research, experimental and technical works).

For citation. Vishnevsky DA, Podlipenskaya LE, Denisova NA, Bondar NA. Methodology for Determining the Parameters of a Mathematical Model of the Dynamics of the Psychophysiological State of a Metallurgical Equipment Operator. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-7-19

Введение. Согласно данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации, к началу 2022 года на металлургических и коксохимических производствах зарегистрировано 1280 опасных производственных объектов, 19 из которых относятся к первому классу опасности, 325 — ко второму, и 922 — к третьему[1]. Как пишет журнал «Промышленные страницы»[2], в 2022 году на российских металлургических предприятиях самыми частыми происшествиями были пожары и взрывы. Эти инциденты обусловлены техническими причинами и нарушениями правил промышленной безопасности. Например, в январе 2022 года трое сотрудников Новолипецкого металлургического комбината проводили плановый осмотр межцехового газопровода без обязательной газозащитной аппаратуры. Рабочие погибли в результате отравления токсичными парами и газом.

В [1] выделены технические, санитарно-гигиенические, организационные и психофизиологические группы факторов аварийности и травматизма на металлургических и коксохимических предприятиях. Последние две группы тесно связаны с человеком — участником производственного процесса. С точки зрения производственной безопасности металлургических предприятий особая ответственность возлагается на операторов высокотехнологичных агрегатов. В инженерной психологии их принято называть «человек-оператор». В рамках представленной работы в этом значении будем употреблять слово «оператор». Иногда именно он предотвращает переход опасности в инцидент или аварию на производстве.

ГОСТ 12.0.003–2015[3] выделяет в самостоятельный блок опасные и вредные производственные факторы психофизиологического воздействия на человека. Оператор испытывает нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса[3]. В их числе:

– умственное перенапряжение;
– перенапряжение анализаторов;
– монотонность труда;
– неуверенность в действиях из-за недостатка образования и опыта.

Эмоциональные перегрузки ведут к переутомлению, плохому самочувствию, стрессовому состоянию и т. п. [1].

Надежность человека как элемента сложной технической системы зависит от внутренних и внешних условий, которые меняются во времени. Есть еще одна переменная — сам человек. Работу выполняют люди с разными личностными качествами, здоровьем, опытом и пр.

В [2] исследовались сведения о несчастных случаях (НС) в кузнечно-прессовом производстве (КПП) за 1985, 1987 и 1989 гг. Отмечены некоторые особенности в распределении по количеству часов от начала работы до инцидента. Эти закономерности можно объяснить человеческим фактором, точнее суточным ритмом трудовой деятельности (рис. 1).

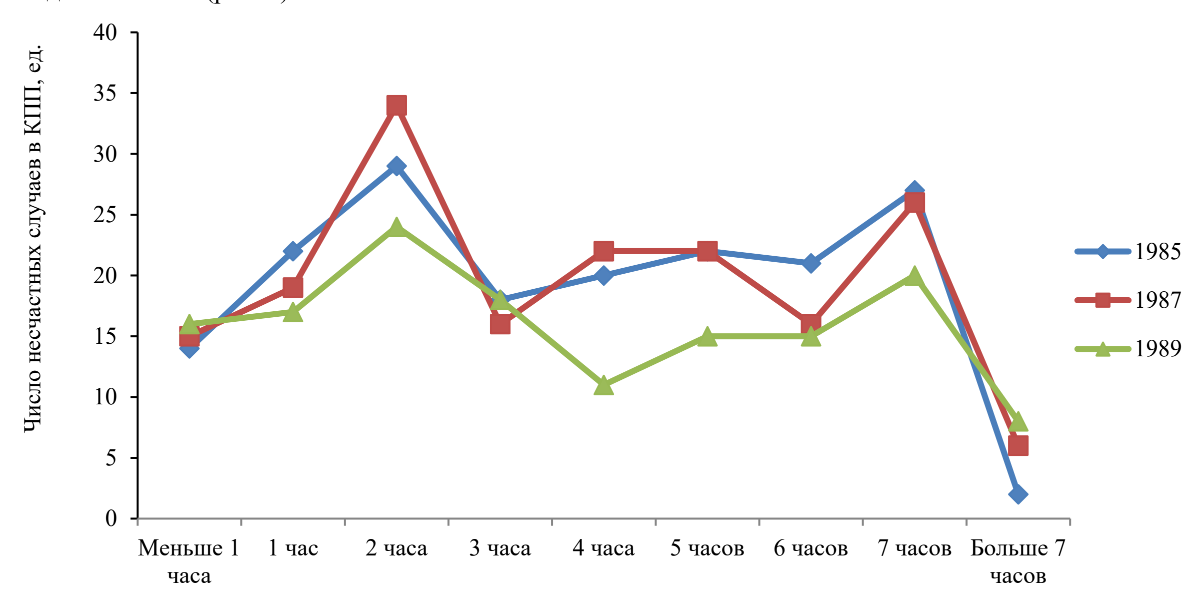


Рис. 1. Распределение НС в кузнечно-прессовом производстве по количеству часов от начала работы до НС [2]

[1] Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году. Москва: 2022. С. 407. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20за%202021%20г.pdf (дата обращения: 22.11.2023).
[2] Опасная тенденция: аварии и ЧС на металлургических производствах в 2022–2023 годах. *Промышленные страницы*. URL: https://indpages.ru/safe/avareeee-na-myetallurgeechyeskeeh-proeezvodstvah/?ysclid=lnshtjh0z2208396380 (дата обращения: 22.11.2023).
[3] ГОСТ 12.0.03–2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200136071 (дата обращения: 21.11.2023).

На графиках рис. 1 достаточно выражена синхронность пиков, а также минимальная аварийность в последние часы работы. Значит, время работы оператора — существенный фактор возникновения несчастного случая на производстве.

В [3] экспериментально установлена необходимость учитывать хронотип оператора при определении профессионально важных качеств.

Для предприятий металлургической отрасли методы математического моделирования эффективны при анализе ситуаций, которые:

– связаны с промышленной безопасностью;

– могут возникнуть в сложной технической системе «человек — машина»;

– формируются и развиваются в различных условиях внутренней и внешней среды.

Математические модели, описывающие психофизиологическое состояние оператора, разрабатывались в различных математических постановках. При этом задействовали инструментарий измерения первичных показателей. В.Г. Абашин выяснил, как использование биометрических технологий связано с психофизиологическим состоянием оператора автоматического рабочего места, его работоспособностью, снижением количества брака и аварий технологического процесса по вине человека [4]. Работоспособность оператора моделируется по клавиатурному почерку. С этой целью применяют нечеткие множества как основу адаптивных моделей — биометрической и мультибиометрической [5].

Авторы [6] используют в математической модели биометрические признаки (голос, клавиатурный почерк и характер работы с компьютерной мышью). Это позволяет судить о психофизиологическом состоянии оператора: норма, усталость, опьянение, возбуждение, расслабление (засыпание). Модели базируются на стратегии Байеса, а также нейросетевом подходе и позволяют оценить уровень ПФС оператора и спрогнозировать его способность к выполнению текущих операций.

В [7] разработаны имитационные математические модели взаимосвязи факторов психофизиологического состояния оператора. Авторы задействовали рекуррентные соотношения в дискретной модели и системы дифференциальных уравнений в непрерывной модели, что позволяет ввести в рассмотрение фактор времени. В этом случае параметры модели определяются по:

– результатам тестирования конкретного работника;

– его способности к определенному виду деятельности;

– итогам экспериментальных исследований рабочего места и функциональных действий оператора.

Эта часть моделирования меньше других формализуется и в наибольшей степени влияет на возможности использования модели для корректировки реальных действий оператора. В настоящее время проблема не решена. Таким образом, сохраняют актуальность вопросы определения параметров математических моделей, которые могут корректно описать взаимосвязи различных факторов психофизиологического состояния оператора. Цель данной статьи — разработка методики определения параметров таких моделей. Научные изыскания в данной сфере будут способствовать выявлению показателей состояния оператора металлургического оборудования, которые влияют на его функциональные характеристики и могут стать причиной серьезных ошибок с негативными последствиями.

Материалы и методы. Для оценки психофизиологического состояния оператора выбрали следующие показатели:

– работоспособность (возможность целенаправленно выполнять работу определенного количества и качества за обозначенное время);

– утомляемость (снижение работоспособности с нарушением координации движений, падением концентрации внимания и точности решений [8]);

– ошибаемость (оценивается количеством ошибочных действий).

Утомление определяется по субъективным и объективным признакам [9]. Субъективный уровень утомления устанавливали по шкале оценки усталости[4] (fatigue assessment scale, FAS) [10]. Ее разработала группа нидерландских ученых под руководством Х. Михильсен (H.J. Michielsen). Это 10 вопросов о ежедневном самочувствии респондента.

В качестве источника объективных параметров в данной работе использовали тест цифровой корректурной пробы (ЦКП)[5]. По его результатам вычислялись экспериментальные значения показателей психофизиологического состояния оператора. Числовые значения параметров модели определяются по названным показателям для конкретного респондента в совокупности с используемой моделью.

[4] Шкала оценки усталости: Fatigue Assessment Scale (FAS). URL: https://wasog.org/dynamic/media/78/documents/Questionairres/fas_rus_anon.html (дата обращения: 21.11.2023).
[5] Цифровая корректурная проба. URL: https://metodorf.ru/tests/korrekt/korrektchis.php (дата обращения: 18.08.2023).

Задача подбора параметров математической модели взаимосвязи различных психофизиологических факторов оператора решается в два этапа.

1-й — экспериментальный. Участников тестируют, собирают данные об условиях работы оператора и его личностных качествах, которые могут влиять на исследуемые параметры трудовой деятельности.

2-й — расчетный. Используется база данных, собранных на 1-м этапе. С учетом выбранной математической модели оцениваются ее параметры для каждого конкретного работника. При достаточном объеме статистических данных в широком диапазоне варьируемых параметров строятся усредненные модели, которые можно применить для прогнозирования изменения психофизиологических показателей работы оператора в различных условиях и с учетом временного фактора.

В данном исследовании для электронного тестирования использовали программу, представленную интернет-ресурсом «Интерактивный портал — книга методик саморазвития и достижения успеха»[6].

При выполнении ЦКП испытуемый строка за строкой просматривал сгенерированный программой числовой массив и зачеркивал цифры, указанные в задании. На выполнение теста давали 3 минуты. Затем программа выдала описанные ниже результаты.

1. Основные первичные показатели:

– время выполнения теста t;

– общее количество просмотренных цифр до последней выбранной цифры N;

– общее количество просмотренных строк C;

– общее количество цифр, которые необходимо вычеркнуть n;

– общее количество вычеркнутых цифр M;

– число верных ответов S;

– число пропущенных цифр P;

– число ошибочно выбранных цифр O.

2. Расчетные показатели, характеризующие:

– скорость (производительность) внимания A;

– точность работы T (в трех вариантах);

– умственную продуктивность E;

– умственную работоспособность A_u;

– концентрацию внимания K;

– устойчивость концентрации внимания K_u;

– объем зрительной информации V;

– скорость переработки информации Q.

Для решения поставленной задачи отобрали показатели, на основе которых оценивались работоспособность X, утомляемость Y и ошибаемость Z оператора по формулам (1–4).

1. Умственная работоспособность A_u (по цифровой корректурной пробе[7], единица измерения — знаков в секунду):

$$A_u = (N / t)\times((M-(O+P))/n)\,. \qquad (1)$$

Для приведения показателя к нормализованной шкале [0, 1] в безразмерных единицах авторы предлагают формулу (2). Результатом будет i-тое значение показателя работоспособности X (соответствует дискретному условному времени i):

$$x_i = A_{ui} \big/ \max\{A_u\}\,, \qquad (2)$$

где $max\{A_u\}$ — максимально возможное значение умственной работоспособности по данному виду теста независимо от тестируемого работника.

Рассмотрим стандартный тест ЦКП с 1600 цифрами. Допустим, респондент за 180 секунд полностью и правильно выполнит тест. В этом случае величина $max\{A_u\}$ составит 8,889 знаков в секунду. Если же тестируемый выполнит тест менее чем за 180 с, значение X при расчете по формуле (2) может оказаться больше 1. Тогда для X принимается значение 1.

2. Утомляемость Y оценивается по показателю K (концентрация внимания):

$$Y = (1 - K / 100)\,, \qquad (3)$$

где $K = (M–0)\ n\ 100$ — коэффициент, характеризующий концентрацию внимания, %.

---

[6] Интерактивный портал — книга методик саморазвития и достижения успеха. URL: https://metodorf.ru/ (дата обращения: 18.10.2023).

[7] Цифровая корректурная проба. URL: https://metodorf.ru/tests/korrekt/korrektchis.php (дата обращения: 18.10.2023).

Данный показатель Y принимает безразмерные значения в интервале [0, 1].

3. Ошибаемость Z предлагается оценить по формуле:

$$Z = (O + P)/(M + P). \tag{4}$$

Данный показатель также принимает значения в интервале [0, 1].

В дальнейшем будем характеризовать X, Y и Z как унифицированные количественные индикаторы психофизиологического состояния оператора, связанные с его основной производственной деятельностью. Для трактовки показателей X, Y и Z разработана шкала, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Интерпретация значений показателей в качественной форме

Показатель	Интервалы значений показателей / качественная характеристика				
Работоспособность X	[0–0,20] низкая	[0,20–0,40] ниже средней	[0,40–0,60] средняя	[0,60–0,80] хорошая	[0,80–1,00] высокая
Утомляемость Y	[0–0,20] низкая	[0,20–0,40] ниже средней	[0,40–0,60] средняя	[0,60–0,80] выше средней	[0,80–1,00] высокая
Ошибаемость Z	[0–0,01] незначительная	[0,01–0,05] заметная	[0,05–0,10] существенная	[0,10–0,20] значительная	[0,20–1,00] высокая

Показатели X, Y и Z — безразмерные, унифицированные со значениями в интервале [0, 1].

На втором этапе для подбора параметров математической модели есть два способа.

1. При помощи модуля «Поиск решения» программы Excel создается сценарий решения системы для некоторых начальных параметров. В его основе — система рекуррентных уравнений математической модели в дискретной форме. Затем «Поиск решения» выдает оптимальные значения параметров модели для целевой функции, равной сумме квадратов отклонений расчетных значений показателей X, Y и Z от экспериментальных.

2. В программе Anylogic[8], которая позволяет в автоматическом режиме подбирать параметры рассматриваемых математических моделей в дискретной форме рекуррентных соотношений и в виде системы дифференциальных уравнений. Anylogic целесообразно использовать после анализа результатов предварительной оценки параметров модели с помощью модуля «Поиск решения» Excel.

Для апробации предлагаемой методики отобрали 10 человек — студентов и сотрудников Донбасского государственного технического университета. Они работали как операторы на учебных тренажерах с автоматическим и полуавтоматическим управлением. В начале и в конце рабочего дня оценивался субъективный уровень утомления по шкале FAS. В начале каждого часа, с 9.00 до 16.00, выполнялись тесты ЦКП. Данные обрабатывали по формулам (1–4) для каждого респондента. Результаты тестирования и их унификацию (X, Y и Z) использовали на втором этапе для определения параметров математической модели.

В данной работе применили модель в рекуррентной форме [7], которая описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + a_1 \dfrac{x_i}{d_1 x_i + c_1} \cdot \left(1 - \dfrac{x_i}{k_1}\right) - b_1 x_i y_i - h x_i z_i, \\[2ex] y_{i+1} = y_i + a_2 \dfrac{y_i}{d_2 y_i + c_2} \cdot \left(1 - \dfrac{y_i}{k_2}\right) + b_2 x_i y_i, \\[2ex] z_{i+1} = z_i + a_3 \dfrac{z_i}{d_3 z_i + c_3} \cdot \left(1 - \dfrac{z_i}{k_3}\right) + b_3 y_i z_i. \end{cases} \tag{5}$$

Решением системы (5) являются три сопряженных временных ряда длиной m индикаторов $X = \{x_i, i=0, 1, 2, ..., m\}$, $Y = \{y_i, i=0, 1, 2, ..., m\}$, $Z = \{z_i, i=0, 1, 2, ..., m\}$. Индекс i — переменная, характеризующая дискретное время в системе. Параметры a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j ($j = 1, 2, 3$) определяются в результате решения оптимизационной задачи по исходным данным тестирования.

[8] AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: https://www.anylogic.ru/ (дата обращения: 12.11.2023).

Математическая модель оптимизационной задачи описывается системой ограничений (6) и целевой функцией (7).

$$\begin{cases} \delta_{xi}(a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j) = (x_i^{\phi} - x_i^{p})^2 \le \Delta, \\ \delta_{yi}(a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j) = (y_i^{\phi} - y_i^{p})^2 \le \Delta, \\ \delta_{zi}(a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j) = (z_i^{\phi} - z_i^{p})^2 \le \Delta, \\ a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j \ge 0, \\ x_i^p \ge 0, y_i^p \ge 0, z_i^p \ge 0, \\ x_i^p \le 1, y_i^p \le 1, z_i^p \le 1, \\ i = 1, \dots, m, \\ j = 1, 2, 3. \end{cases} \tag{6}$$

$$\Psi(a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j) = \sum_{i=1}^{m} \delta_{xi} + \sum_{i=1}^{m} \delta_{yi} + \sum_{i=1}^{m} \delta_{zi} \to min\,. \tag{7}$$

Здесь индексом *ф* помечены фактические значения индикаторов *X*, *Y* и *Z*, найденные в результате обработки данных тестирования оператора, *p* — расчетные значения *X*, *Y* и *Z*, определяемые из решения системы (5) и зависящие от искомых в данной задаче оптимизации переменных a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j (j = 1, 2, 3). На варьируемые переменные a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j ограничения задаются по максимально допустимому значению Δ квадратов отклонений (δ_{xi}, δ_{yi}, δ_{zi}) расчетных значений *X*, *Y* и *Z* от фактических для всех *m* значений рассматриваемых временных рядов. Целевая функция $\Psi(a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j)$ равна сумме квадратов отклонений (δ_{xi}, δ_{yi}, δ_{zi}).

Для решения оптимизационной задачи применялся метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ).

Результаты исследования. 1-й этап — экспериментальный. Результаты тестирования участников эксперимента (респонденты №1–№10), преобразованные к унифицированным показателям *X*, *Y* и *Z*, представлены на диаграммах размаха (рис. 2–4). В виде точки показан центр распределения (медиана), прямоугольник обозначает границы варьирования (квартили 25 % – 75 %), «усики» — нижнюю и верхнюю границу значений показателя (min — max). Диаграммы выполнены с помощью программного комплекса «Statistica».

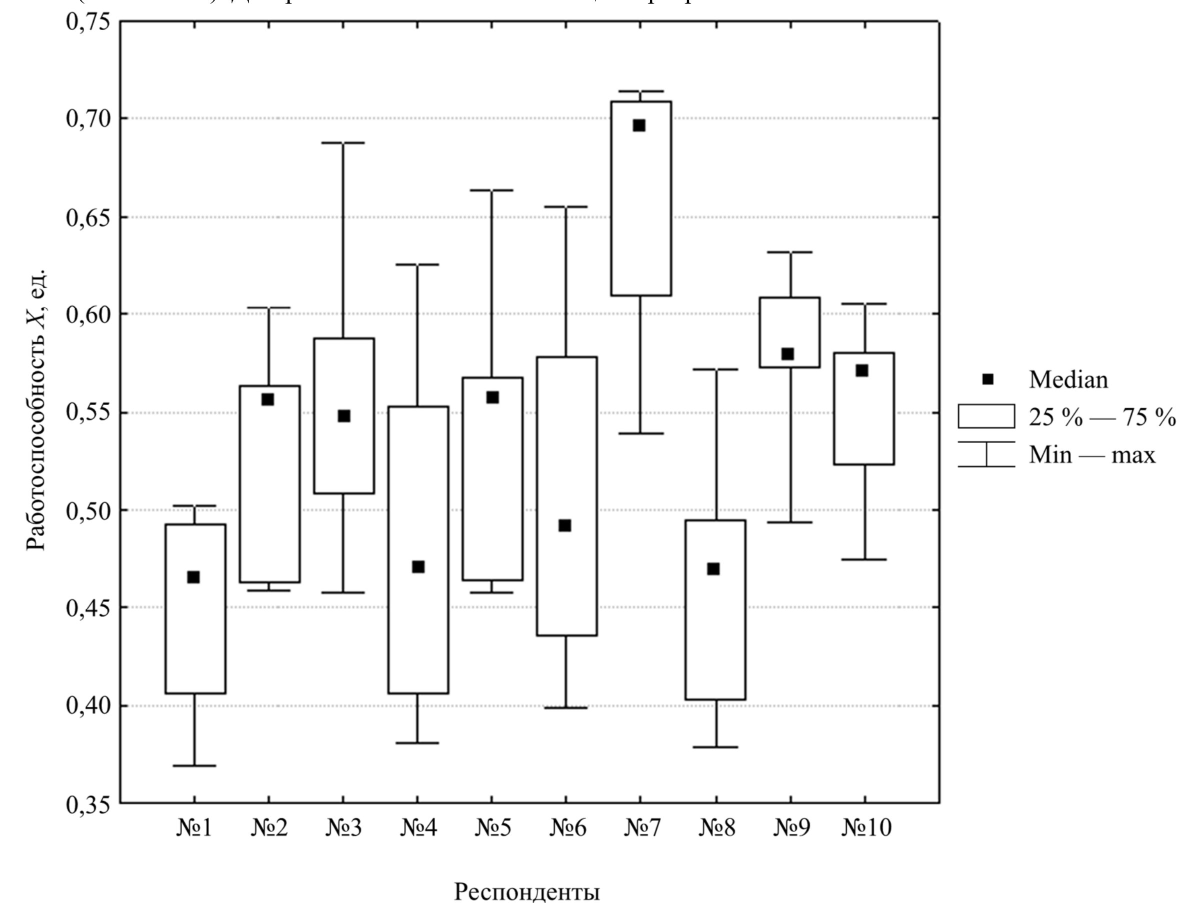


Рис. 2. Показатели работоспособности операторов

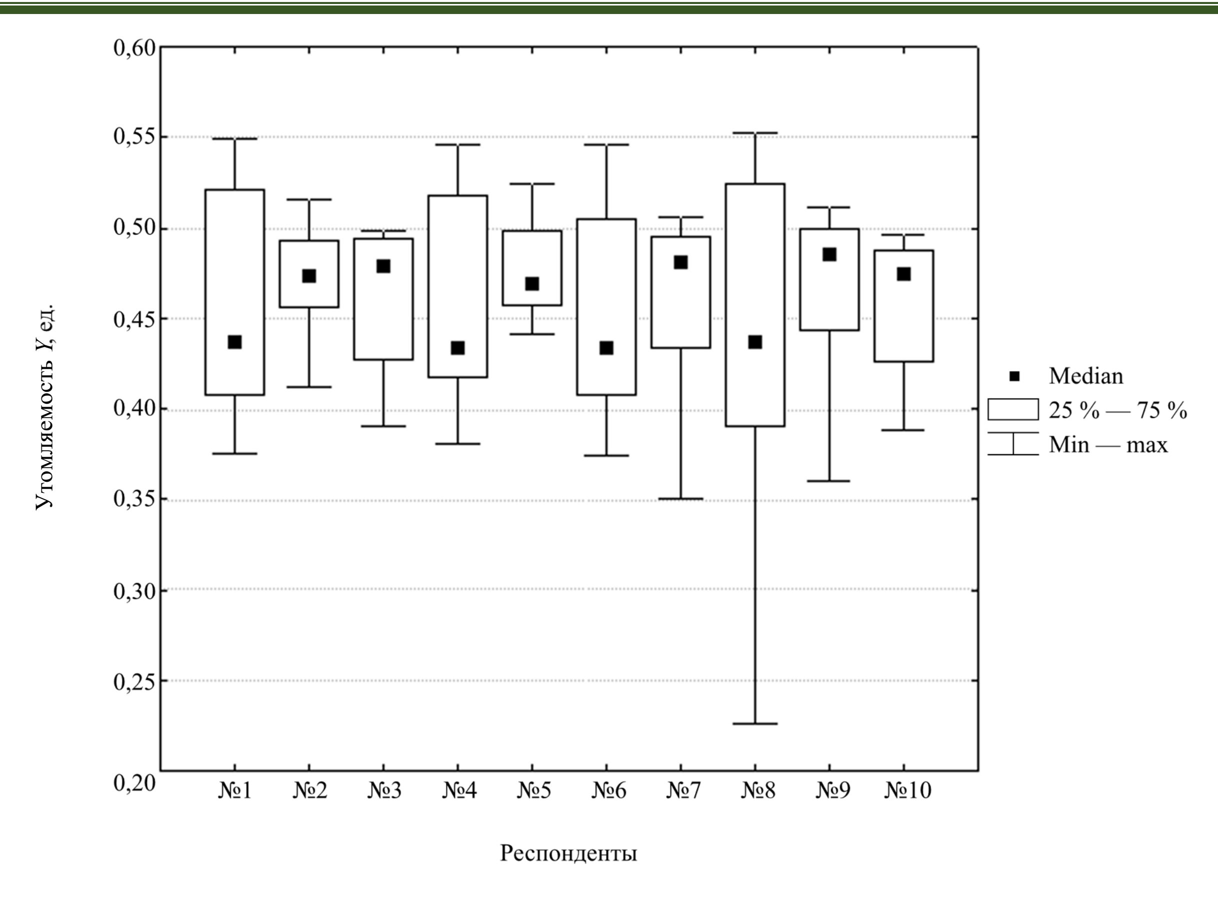


Рис. 3. Показатели утомляемости операторов

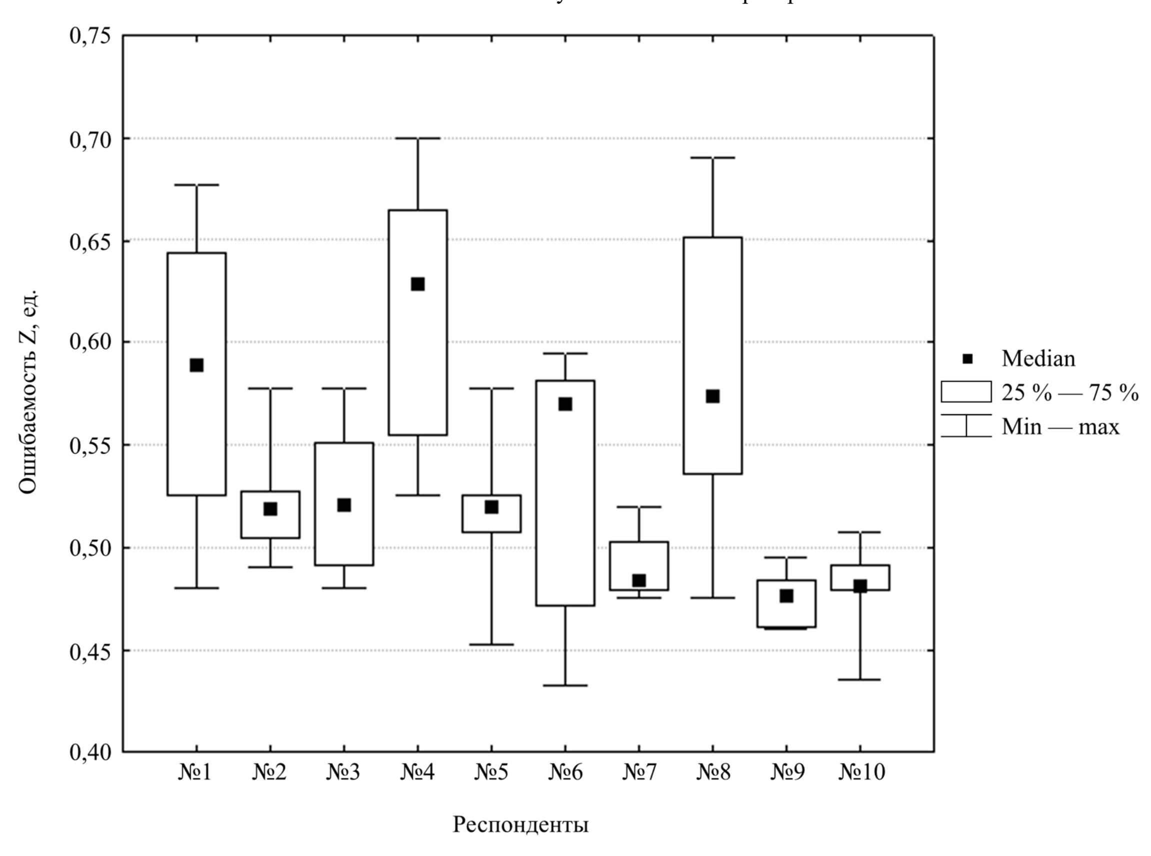


Рис. 4. Показатели ошибаемости операторов

Анализ рис. 2–4 позволил выделить респондентов с лучшими и худшими оценками их деятельности (таблица 2). Учитывались уровни показателей *X*, *Y* и *Z*, соотнесенные с градациями таблицы 1, а также квартили и интервалы варьирования показателей.

Таблица 2

Ранжирование респондентов по результатам тестирования

Критерий оценки	Варианты (№ респондента)	
	наихудшие	наилучшие
Работоспособность *X* (чем больше, тем лучше)	8, 1, 4, 6	7, 9, 3
Утомляемость *Y* (чем больше, тем хуже)	8, 1, 4, 6	7, 10
Ошибаемость *Z* (чем больше, тем хуже)	4, 8, 1	9, 10, 7
Интегрально (с учетом *X*, *Y*, *Z*)	8, 4, 1	7, 10, 9

Графики на рис. 5 отражают динамику работоспособности для респондентов № 7 (пунктирная линия, лучший результат) и № 8 (сплошная линия, худший результат).

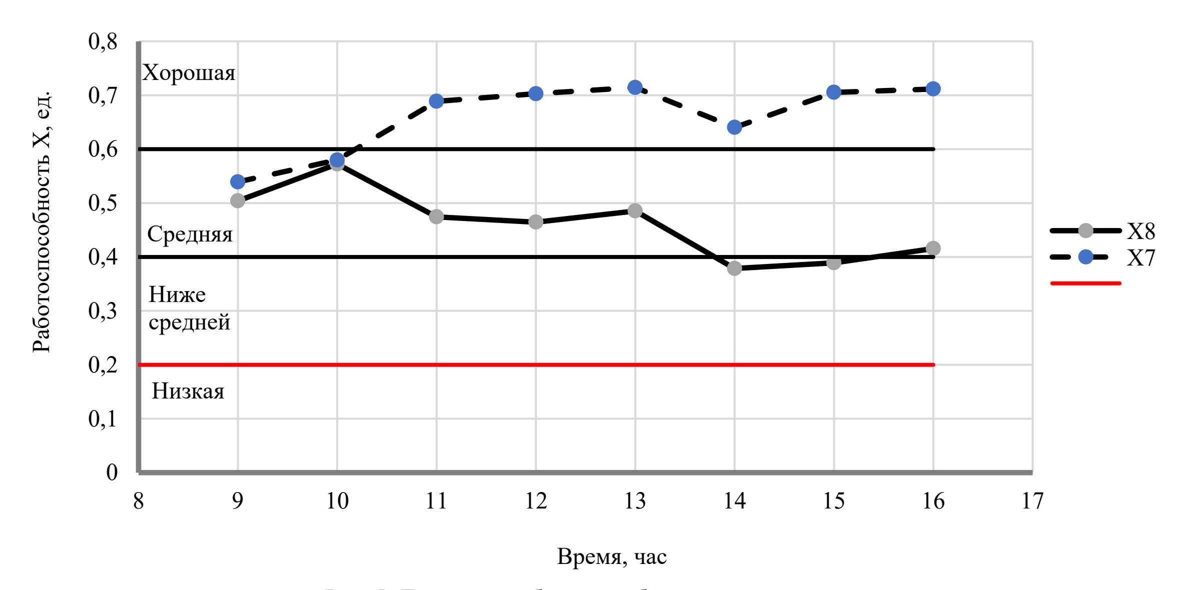


Рис. 5. Динамика работоспособности операторов

Для объяснения достаточно большой разницы данных респондентов 7 и 8 учитывали их возраст, пол, род занятий, самочувствие и др. Наиболее существенным оказался фактор хронотипа. Классификация, принятая в 1970 году, подразумевает три категории людей с отличительными поведенческими признаками и генетической разницей биоритмов. Это так называемые «жаворонки», «совы» и «голуби» [11]. Респондент № 8 по хронотипу — «жаворонок», № 7 — «сова». В результате работоспособность № 8 снижается к концу дня, а № 7 — повышается (рис. 5). Хронофизиологические особенности операторов проявляются также в динамике их утомляемости и ошибаемости.

2-й этап — расчетный. Получены параметры модели (5), рассчитанные для каждого участника эксперимента. С этой целью решили оптимизационную задачу (6)–(7). Диапазоны изменения параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3

Диапазоны параметров математической модели (5) для группы участников эксперимента

Показатель	Диапазоны параметров	Показатель	Диапазоны параметров
a_1	0,0004–0,0300	b_3	0,0001–10,1400
b_1	0–0,9700	k_3	0,0020–0,0700
k_1	0,5900–1,0000	c_1	0,0010–0,2000
h	0–1,8100	c_2	0,0001–0,0010
a_2	0–0,0010	c_3	0,0100–0,3300
b_2	0,0070–0,2600	d_1	≈ 0
k_2	0,4200–1,0000	d_2	≈ 0
a_3	0,0005–0,0600	d_3	0,0400–0,9800

В таблице 4 представлены результаты оценки качества математических моделей динамики изменения показателей *X*, *Y* и *Z*, оцениваемых по среднеквадратической ошибке модели и средней относительной ошибке для всех испытуемых.

Таблица 4

Оценка качества математических моделей

№ респондента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Средняя относительная ошибка ε, %	14,27	4,54	20,93	12,80	7,28	12,00	9,66	15,03	12,23	9,70
Среднеквадратическая ошибка, ед.	0,182	0,107	0,253	0,267	0,158	0,247	0,271	0,256	0,192	0,166

Для разных респондентов показатели качества модели варьируются в широком диапазоне. Отличное качество ($\varepsilon \leq 5$ %) получено в одном случае, хорошее ($\varepsilon \leq 10$ %) — в трех случаях, удовлетворительное ($\varepsilon \leq 15$ %) — в четырех. Для двух случаев (№ 3 и № 8) не удалось удовлетворительно решить задачу оптимального подбора параметров математической модели. Это говорит о том, что не все влияющие факторы учтены либо модель (5) в некоторых случаях не работает.

Согласно результатам анализа алгоритма решения поставленной задачи, ряд упрощений улучшит сходимость результатов. Можно, например:

– уменьшить на 3 ед. число параметров системы (5), сократив числители и знаменатели вторых слагаемых правых частей системы на c_1, c_2, c_3 соответственно;

– удалить из системы (6) ее первое, второе и третье ограничения, переведя их в статус наблюдаемых ограничений.

В итоге алгоритм метода ОПГ будет работать лучше.

На рис. 6 и 7 приведены сравнительные диаграммы оценки качества построенных математических моделей в двух вариантах:

– 1 — исходная модель (5);

– 2 — модифицированная модель.

Как видно из диаграмм, решение задачи подбора параметров математической модели динамики показателей ПФС оператора значительно улучшено при использовании модели 2 для всех случаев, кроме № 8.

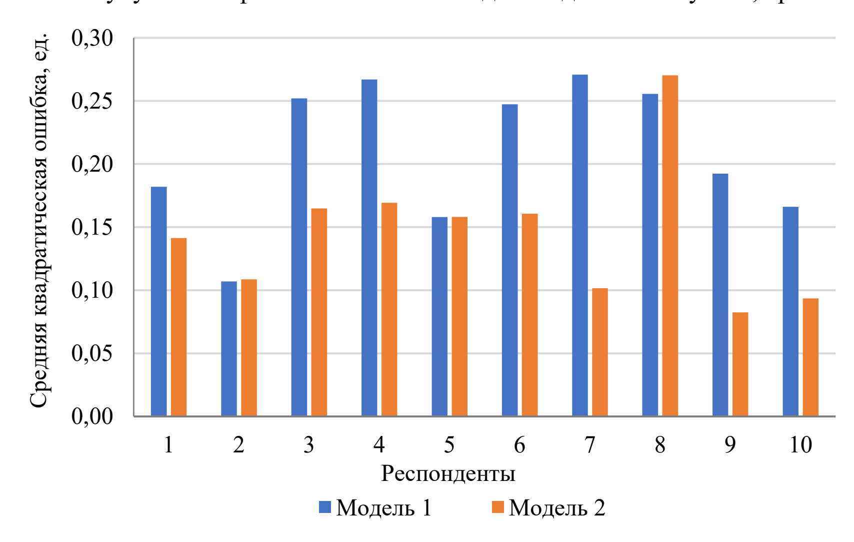


Рис. 6. Сравнение математических моделей по средней квадратической ошибке

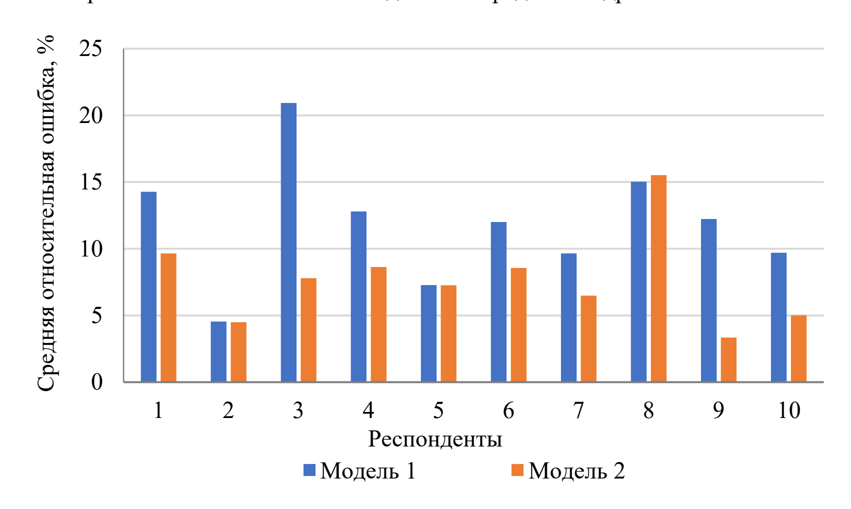


Рис. 7. Сравнение математических моделей по средней относительной ошибке

Обсуждение и заключение. Предложенный подход позволяет получить и прогнозировать для каждого индивидуума динамические профили его психофизиологических характеристик, составить математические модели взаимосвязей. Целесообразно увеличить объем выборки, уменьшить шаг дискретного времени и выполнить исследования для различных условий работы, включающие технологические, климатические, экологические, психологические и прочие факторы, которые могут влиять на эффективность работника. Это следует сделать для расширения функциональных возможностей моделей, их применения в реальных условиях работы оператора металлургического оборудования.

Обнаруженный эффект влияния хронотипа человека на его ПФС требует более основательных исследований. В статье [12], посвященной поиску компонентов циркадных часов у людей, на больших статистических выборках показано, что хронотип зависит от многих факторов (пол, возраст, график работы и др.). Все это необходимо диагностировать и учитывать в математических моделях оценки ПФС операторов.

Интересно также дополнить модель компонентами культуры производственной безопасности [13], которые можно привести к количественному виду и использовать как поправочные коэффициенты.

В дальнейшем предполагается усовершенствовать модель дополнительными переменными. Для этого нужно зафиксировать психофизиологические показатели и определять местонахождения оператора в режиме реального времени.

Представленную в работе методику можно взять за основу при решении описанных ниже задач.

– Составление и анализ динамического профиля работника при приеме на работу в качестве оператора машины, агрегата или устройства, где важны такие характеристики ПФС, как работоспособность, утомляемость и ошибаемость. Эта задача решается для конкретного человека в определенных условиях производства, что позволяет подобрать оптимальный режим работы и отдыха оператора, способствует сохранению здоровья специалиста и повышению уровня промышленной безопасности предприятия.

– Формирование и ведение специализированных баз статистических данных, включающих характеристики рабочих мест и сотрудников, в том числе их психофизиологическое состояние. На основе собранного статистического материала и систем мониторинга ПФС оператора в режиме реального времени можно строить прогнозные модели для предупреждения нештатных и аварийных ситуаций на металлургических предприятиях.

Список литературы

1. Негреева В.В., Василенок В.Л., Кагиян О.А. Исследование проблем охраны труда и их влияние на промышленную безопасность предприятий черной металлургии. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2019;(4):41–50. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50

2. Вишневский Д.А. Исследования распределения несчастных случаев в кузнечно-прессовом производстве по месту происшествия и по времени от начала работы. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2018;12(55):84–90.

3. Кудрин Р.А., Лифанова Е.В., Плотникова А.В. Биоэлектрическая активность головного мозга у операторов с разным хронотипом. *Вестник ВолГМУ*. 2019;1(69):116–119. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-1(69)-116-119

4. Абашин В.Г. *Автоматизация процесса определения психофизиологического состояния оператора автоматизированного рабочего места в АСУТП.* Автореф. дис. канд. тех. наук. Орел; 2008. 20 с. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01003315723.pdf?ysclid=lrfzw8ogf4552201100 (дата обращения: 03.11.2023).

5. Абашин В.Г. Адаптивная математическая модель мультибиометрической подсистемы определения работоспособности человека-оператора АРМ на основе нечетких множеств. *Информационные системы и технологии*. 2011;5(67):90–95. URL: https://oreluniver.ru/file/archive/ISiT%205-20111.pdf (дата обращения: 21.112023).

6. Васильев В.И., Сулавко А.Е., Борисов Р.В., Жумажанова С.С. Распознавание психофизиологических состояний пользователей на основе скрытого мониторинга действий в компьютерных системах. *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2017;(3):21–37.

7. Vishnevskiy D.A., Petrov P.A. Mathematical correlation modeling for the operator's operability, fatigue and error-making in metallurgical industry using anylogic system dynamics tools. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022;32:50–55. https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-32-50-55

8. Городецкий И.Г., Парахин А.В. Обзор физиологических, субъективных и объективных параметров для оценки работоспособности оператора. *StudNet.* 2020;3(9):699–707. https://doi.org/10.24411/2658-4964-2020-1101

9. Бубнова А.Е. Комплексная оценка субъективных и объективных физиологических характеристик критического уровня утомления у операторов МЧС. *Вестник ВолГМУ*. 2019;3(71):91–95. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-3(71)-91-95

10. Michielsen H.J., Vries J.D., Van Heck G.L. Psychometric qualities of a brief self-rated fatigue measure: the fatigue assessment scale. *Journal of Psychosomatic Research*. 2003;54(4):345–352. https://doi.org/10.1016/s0022-3999(02)00392-6

11. Глуткин С.В., Чернышева Ю.Н., Зинчук В.В., Балбатун О.А., Орехов С.Д. Физиологическая характеристика лиц с различными хронотипами. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2017;16(2):48–58. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologicheskaya-harakteristika-lits-s-razlichnymi-hronotipami/viewer (дата обращения: 21.11.2023).

12. Allebrandt K.V., Roenneberg T. The search for circadian clock components in humans: new perspectives for association studies. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. 2008;41(8):716–721. https://doi.org/10.1590/S0100-879X2008000800013

13. Суфиянова М.А., Волохина А.Т., Глебова Е.В. Разработка механизмов повышения культуры производственной безопасности по результатам анализа анкетирования работников. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(4):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79

References

1. Vasilenok VL, Negreeva VV, Kagiyan OA. Problems of labor protection and industrial safety of ferrous metallurgy enterprises. *Scientific journal NRU ITMO Series "Economics and Environmental Management"*. 2019;(4):41–50. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50 (In Russ.).

2. Vishnevskyi DA. Study the accident distribution in the press-forging production at the scene and the time period from the beginning of the work. *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2018;12(55):84–90. (In Russ.).

3. Kudrin RA, Lifanova EV, Plotnikova AV. Bioelectrical activity of the brain in operators with different chronotypes. *Journal of Volgograd State Medical University*. 2019;1(69):116–119. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-1(69)-116-119 (In Russ.).

4. Abashin VG. Avtomatizatsiya protsessa opredeleniya psikhofiziologicheskogo sostoyaniya operatora avtomatizirovannogo rabochego mesta v ASUTP. Author's thesis Oryol; 2008. 20 p. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01003315723.pdf?ysclid=lrfzw8ogf4552201100 (accessed: 03.11.2023). (In Russ.).

5. Abashin VG. Adaptive mathematical model of the multibiometrics subsystem of definition of working capacity of the operator of a automated workplace on the basis of fuzzy sets. *Information Systems and Technologies.* 2011;5(67):90–95. URL: https://oreluniver.ru/file/archive/ISiT%205-20111.pdf (accessed: 21.112023). (In Russ.).

6. Vasilyev VI, Sulavko AE, Borisov RV, Zhumazhanova SS. Recognition of psychophysiological state of the user based on a hidden monitoring of computer systems. *Artificial Intelligence and Decision Making.* 2017;(3):21–37. (In Russ.).

7. Vishnevskiy DA, Petrov PA. Mathematical correlation modeling for the operator's operability, fatigue and error-making in metallurgical industry using anylogic system dynamics tools. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022;32:50–55. https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-32-50-55

8. Gorodetsky IG, Parakhin AV. Review of physiological, subjective and objective parameters for evaluating the operator performance. *StudNet.* 2020;3(9):699–707. https://doi.org/10.24411/2658-4964-2020-1101 (In Russ.).

9. Bubnova AE. The subjective and objective physiological characteristics complex assessment of the critical level of fatigue among EMERCOM operators. *Journal of Volgograd State Medical University.* 2019;3(71):91–95. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-3(71)-91-95 (In Russ.).

10. Michielsen HJ, Vries JD, Van Heck GL. Psychometric qualities of a brief self-rated fatigue measure: the fatigue assessment scale. *Journal of Psychosomatic Research*. 2003;54(4):345–352. https://doi.org/10.1016/s0022-3999(02)00392-6

11. Glutkin SV, Chernyshova JN, Zinchuk VV, Balbatun AA, Orehov SD. Physiological characteristics of persons with different chronotypes. *Vestnik of Smolensk State Medical Academy*. 2017;16(2):48–58. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologicheskaya-harakteristika-lits-s-razlichnymi-hronotipami/viewer (accessed: 21.11.2023). (In Russ.).

12. Allebrandt KV, Roenneberg T. The search for circadian clock components in humans: new perspectives for association studies. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. 2008;41(8):716–721. https://doi.org/10.1590/S0100-879X2008000800013 (In Russ.).

13. Sufiyanova MA, Volokhina AT, Glebova EV. Development of mechanisms for industrial safety culture improvement based on employee survey analysis results. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79 (In Russ.).

Поступила в редакцию 21.12.2023
Поступила после рецензирования 15.01.2024
Принята к публикации 19.01.2024

Об авторах:

Дмитрий Александрович Вишневский, доктор технических наук, профессор, ректор Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), SPIN-код: 6646-4307, ORCID

Лидия Евгеньевна Подлипенская, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), SPIN-код: 8418-4319, ORCID, lida.podlipensky@gmail.com

Наталия Анатольевна Денисова, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин металлургического комплекса Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), SPIN-код: 7858-4226, natdeny@yandex.ru

Надежда Александровна Бондарь, научный сотрудник научно-исследовательской части Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), nadonet2007@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Авторы внесли равноценный вклад в постановку задачи и определение цели исследования, проведение экспериментов и расчетов, формулирование выводов и корректировку текста статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 21.12.2023
Revised 15.01.2024
Accepted 19.01.2024

About the Authors:

Dmitry A. Vishnevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), SPIN-code: 6646-4307, ORCID

Lidiya E. Podlipenskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Ecology and Life Safety Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), SPIN-code: 8418-4319, ORCID, lida.podlipensky@gmail.com

Nataliya A. Denisova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Machines of the Metallurgical Complex Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), SPIN-code: 7858-4226, natdeny@yandex.ru

Nadezhda A. Bondar, Researcher, Research Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), nadonet2007@yandex.ru

Claimed contributorship:

The authors made an equivalent contribution to the formulation of the task and the definition of the aim of the study, conducting experiments and calculations, drawing conclusions and correcting the text of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.